

引用格式: Wang Ying, Wu Xin, Ma Xiaoxue. Experimental Study of Direct-Expansion Solar Floor Heating System in Lanzhou[J]. Journal of Gansu Sciences, 2015, 27(1): 135-139. [王瑛, 吴鑫, 马晓雪. 兰州市直膨式太阳能热泵无水采暖系统实验研究[J]. 甘肃科学学报, 2015, 27(1): 135-139.]  
doi: 10.16468/j.cnki.issn/1004-0366.2015.01.029.

# 兰州市直膨式太阳能热泵无水采暖系统实验研究

王 瑛, 吴 鑫, 马晓雪

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要 提出了一种新型的无水采暖系统方法, 针对兰州市的采暖系统进行了实验研究, 并对其热工性能进行了分析。在此基础上, 得出系统运行期间的平均能效比 COP 为 3.01, 系统所能达到的最大能效比为 3.81, 室内温度最高可以达到 24 °C, 能满足兰州市冬季供暖的要求与室内热舒适性要求。

关键词 直接膨胀式; 地板辐射采暖; 性能系数

中图分类号: TU832.1<sup>+</sup>7

文献标志码: A

文章编号: 1004-0366(2015)01-135-05

太阳能在寒冷地区应用时存在着低密度、间断性和不稳定性等缺陷。早在 20 世纪 50 年代, 国际上就开始对直膨式太阳能采暖系统进行研究, 并出现了许多实验研究与模拟计算的报道, 但由于各地气候条件、结构参数和匹配关系的差异, 使得各系统的热性能差别很大<sup>[1-3]</sup>。

直接膨胀式(简称直膨式)系统将太阳能集热器与热泵蒸发器合二为一, 使得制冷剂可以在太阳能集热/蒸发器中直接吸热蒸发, 节省了非直膨式系统中集热循环与热泵循环之间的换热设备, 不仅简化了系统结构, 而且可以有效提高集热器性能和热泵供热性能<sup>[4]</sup>。

研究在热力学分析的基础上, 通过借鉴国外经验, 结合兰州市(寒冷地区)的地理位置与气候特点, 建立了直膨式太阳能热泵无水采暖系统实验台, 并对其热工性能进行了大量的理论分析和实验研究, 为进一步实现系统的优化设计和自动控制提供依据。

## 1 系统实验原理及装置

### 1.1 系统组成

建立直接膨胀式太阳能无水地暖实验房系统, 该系统主要由太阳能集热/蒸发器、传输增压介质的

压缩机和冷凝器(储热水箱)、气液分离器、储液器、干燥过滤器及热力膨胀阀等部件组成。上述部件通过传输管道相互连通形成回路, 所述的冷凝器设置在带有进出口管的储热水箱中。

其主要部件的结构参数如下: (1) 太阳能集热/蒸发器: 全铝板式结构, 无透明盖层或底部保温, 表面涂刷吸热性材料, 有效集热面积为 2 m<sup>2</sup>; (2) 压缩机: 小型全封闭活塞压缩机, 额定输入功率为 1 930 W, 排气量为 7.95 cm<sup>3</sup>; (3) 地板辐射采暖管路: 承压管路; (4) 节流机构: 外平衡式热力膨胀阀。系统原理如图 1 所示。

系统的循环原理:

(1) 低压液态循环工质(R417a)经过太阳能聚热板, 在太阳能聚热板中工质吸热蒸发, 把太阳能聚热板吸收的太阳能吸收, 此时工质从低温热源处吸收热量变成低温低压蒸汽进入主机;

(2) 工质经过压缩机压缩、升温后, 变成高温、高压的蒸汽排出主机;

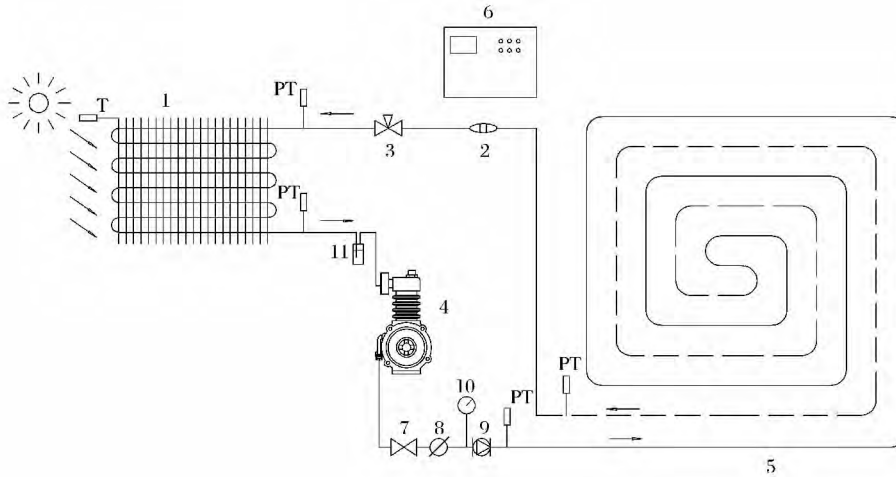
(3) 蒸汽进入换热器(地暖盘管), 在换热器(地暖盘管)中将从太阳能聚热板中吸取的热量和压缩机功耗所产生的热量传递给室内, 使得室内温度提高。而工质经过换热器(地暖盘管)放热后变成高压液体;

收稿日期: 2013-12-26; 修回日期: 2014-01-13.

基金项目: 国家十二五科技支撑计划(2011BAJ03B08).

作者简介: 王瑛(1969-), 男, 甘肃礼县人, 教授, 研究方向为市政工程与环保节能. E-mail: 1085959667@qq.com.

通讯作者: 吴鑫. E-mail: noheartwx@163.com.



1. 太阳能集热/蒸发器; 2. 过滤器; 3. 势力膨胀阀; 4. 传输增压介质的压缩机; 5. 加压地板辐射采暖盘管; 6. 数据采集控制柜  
7. 截止阀; 8. 流量计; 9. 循环泵; 10. 压力表; 11. 气液分离器; PT. 温度压力采集器; T. 温度采集器

图1 直接膨胀式无水地板采暖系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of the direct-expansion solar floor heating system

(4) 高压液体经过节流元件节流降压后, 变成低压液体, 低压液态工质再次进入太阳能板, 不断地循环工作。

1.2 实验房间概况

根据《民用建筑热工设计规范》<sup>[5]</sup> 规定的建筑热工分区, 兰州属于寒冷地区, 其冬季寒冷且长, 需采暖, 冬季采暖室外计算(干球)温度为-11℃, 最冷月为1月份。兰州属于太阳能资源较丰富区, 在冬季最冷月一月份水平面月平均太阳辐照量为 8.178 MJ/m<sup>2</sup>·d, 倾斜表面月平均太阳辐照量为

11.312 MJ/m<sup>2</sup>·d, 月日照小时数可以达到 162 h。

实验房间设于兰州理工大学实验中心 1 楼朝南向的房间, 总建筑面积为 19m<sup>2</sup>, 建筑围护结构热工参数见表 1。

太阳能地板辐射采暖系统表面为木质地板, 填充层为轻质水泥, 盘管间距为 200 mm, 管材为加压铜管, 保温层为 60 mm 厚的苯板。

以实验房间为研究对象, 通过直膨式太阳能热泵采暖系统在冬季运行的实际情况来反映这种新型系统在兰州市的应用前景。

表 1 建筑围护结构热工参数

Table 1 Thermal parameter of the building palisade structure

围护结构名称	材料	传热系数 /(W·(m <sup>2</sup> ·K) <sup>-1</sup> )
外墙	20 mm 水泥砂浆+50 mm 聚苯复合板+10 mm 空气层+240 mm 多孔砖+20 mm 水泥砂浆	0.38
地面	混凝土基层下沿外墙皮 2 m 范围内设 150 mm 厚 2:8 白灰苯板保温层	0.497
窗户	单框中空玻璃塑钢窗	1.3
外门	保温外门	2

2 实验研究

2.1 实验方案及测试数据

实验利用制热系数作为评价直膨式太阳能无水地暖系统性能的主要指标, 即

$$COP = \frac{Q_w}{W_{comp}} = \frac{\sum_j q_w \tau_j \times F}{\sum_j W_{comp} \tau_j} \quad (1)$$

其中: Q<sub>w</sub> 为房间的得热功率(kW); F 为地面面积

(m<sup>2</sup>); τ 为数据采集间隔时间(s); 角标“j”表示第 j 个数据采集时段; 利用电力监测仪测得 t<sub>0</sub> ~ t 这段时间内消耗的电能。

加压的地暖盘管作为冷凝器散布于房间地板表面, 由于该表面同时以对流和辐射两种方式与室内环境进行热量交换, 但考虑到室内空气并不以散热、吸收和再发射等形式参与辐射, 对流换热可以独立于辐射换热来确定; 室内房间的热量计算采用 ASHRAE 手册<sup>[5-7]</sup> 推荐的热地板对流传热公式以及地板与其

他各围护结构表面之间的辐射换热公式有

$$q = q_f + q_d, \quad (2)$$

$$q_d = 2.18 (t_{pj} - t_n)^{1.31}, \quad (3)$$

$$q_f = 4.98 \times 10^{-8} [(t_{pj} + 273)^4 - (t_{fj} + 273)^4], \quad (4)$$

$$t_{fj} = \frac{\sum F_i t_i}{\sum F_i}, \quad (5)$$

其中: $q$  为单位地面面积传热量( $\text{W}/\text{m}^2$ ); $q_f$  为单位地面面积辐射传热量( $\text{W}/\text{m}^2$ ); $q_d$  为单位地面面积对流传热量( $\text{W}/\text{m}^2$ ); $t_{pj}$  为地表面平均温度( $^{\circ}\text{C}$ ); $t_{fj}$  为室内非加热表面的面积加权平均温度( $^{\circ}\text{C}$ ); $t_n$  为室内计算温度( $^{\circ}\text{C}$ ); $F_i$  为房间内非加热表面面积( $\text{m}^2$ ); $t_i$  为房间内非加热表面温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

根据上述计算,得出需要测量的参数,包括太阳能集热/蒸发器进、出口温度  $T_a/T_o$ , 无水地暖盘管(冷凝器)进、出口温度压力  $P_{c1}/P_{c2}$ , 压缩机吸气温度  $T_s$ , 环境温度  $T_a$ , 室内温度  $T_w$ , 集热板表面温度  $T_p$ , 太阳辐射强度  $I_s$ , 压缩机耗功量  $W_c$ [8]。

采用 TYD-2D 可再生能源建筑应用检测测评系统记录仪记录时间、太阳辐射(瞬时功率、日累计量)、风速、流量。

采用 TYD-WD120 型温度测试系统,利用 P100 铂热电阻测量温度(各测点温度),测量精度为  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

主机及压缩机耗电量采用微型电力检测仪测累计电量。

## 2.2 实验方法

实验测试内容主要分两部分:直膨式无水地暖的性能和供暖房间的热环境。测试在 2012 年 12 月

16 日—2013 年 1 月 18 日进行,其中选取具有研究意义的气候状况与温度进行研究,测试期间,每天早上 9:00 开热泵主机,下午 17:00 关热泵主机。实验操作步骤有:

(1)连续性供暖实验进行前,设定室内温度(室内中心线距地板 0.75 m 处的测点温度) $t_n$  为系统负荷调节点,当  $t_n = 22^{\circ}\text{C}$  时停止主机运转节约能耗,当  $t_n = 18^{\circ}\text{C}$  时启动主机为室内加热提供热负荷。然后启动计算机自动数据采集系统以及电功率表,数据存储间隔时间设为 15 min,以便及时反映系统参数随时间的动态变化情况,最后开启主机;

(2)计算机自动采集数据,自动记录下启机时间,并每隔 15 min 采集存储一次系统的各运行参数及数据至文档中,直至室内温度稳定在设定温度;

(3)最后将此次实验的所有原始数据加以汇总、整理和分析,并计算其能效比(COP)用以评价系统的热力性能及房间热环境。

## 3 结果与分析

针对直接膨胀式太阳能无水采暖系统在兰州市进行了冬季阶段性实验研究,选取室外气象条件具有季节代表性的实验数据,针对系统性能进行热力学分析。为此,选出具有代表性的不同天气状况(晴、多云、雨雪),通过对系统性能、采暖能力以及效率的影响来说明供暖的实际状况。

整个实验测试期间,为了对系统性能作出较为全面的考察和分析,将室内温度  $T_w$ 、集热/蒸发板温度  $T_p$ 、地暖盘管进出口温度  $T_{w1}$ 、 $T_{w2}$  及系统平均供热性能系数 COP 随运行时间的变化关系见表 2。

表 2 采暖实验结果

Table 2 Experimental data of heating

实验日期	运行时间 $\Delta\tau/\text{min}$	累计辐射量 $H/(\text{MJ} \cdot \text{m}^2)$	室外温度 $T_a/(^{\circ}\text{C})$	初始室内温度 $t_{n,c}/(^{\circ}\text{C})$	终止室内温度 $t_n/(^{\circ}\text{C})$	地表温度 $t_{pj}/(^{\circ}\text{C})$	地暖盘管进口温度 $T_{w1}/(^{\circ}\text{C})$	地暖盘管出口温度 $T_{w2}/(^{\circ}\text{C})$	系统耗电量 $W_c/\text{kWh}$	平均供热性能系数 COP
2012-12-16(多云)	660	8.7	$6^{\circ}\text{C} \sim -4^{\circ}\text{C}$	9.2	22.2	26.6	67.8	39.1	1.2	3.13
2012-12-20(小雪)	660	9.1	$-2^{\circ}\text{C} \sim -8^{\circ}\text{C}$	6.8	22.6	26.8	69.1	42.1	1.0	3.21
2012-12-24(晴)	660	17.5	$-1^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$	7.2	23.2	27.0	68.1	43.6	2.0	3.12
2012-12-28(小雪)	660	13.4	$-5^{\circ}\text{C} \sim -14^{\circ}\text{C}$	6.4	23.2	26.7	64.1	41.8	1.8	2.52
2012-12-29(多云)	660	9.0	$-6^{\circ}\text{C} \sim -15^{\circ}\text{C}$	5.8	22.6	26.0	66.8	44.4	1.3	2.81
2013-01-01(晴)	660	19.4	$-2^{\circ}\text{C} \sim -13^{\circ}\text{C}$	5.6	23.2	27.6	66.4	45.0	1.0	2.72

从表 2 可以看出,通过调节系统参数稳定供热的时候,地板表面的温度在  $26^{\circ}\text{C}$ ,室内温度可以达

到  $22^{\circ}\text{C}$ ,完全满足室内供暖需求,见图 2(a)。

随着热交换的进行,集热/蒸发板向空气的对流

散热损失也将逐渐增大,从而达到热量收支的动态平衡,见图 2(b)。由于在太阳能集热/蒸发器中,太阳能集热温度与制冷剂蒸发温度始终保持一致,因此在太阳能辐射条件较好的时间内,系统将具有较高的蒸

发温度并获得较高的系统性能,而当辐射条件较差时,太阳能集热/蒸发器则主要从空气中吸收热量(此时相当于一个风冷换热器),蒸发温度将低于环境温度,系统工作性能将与空气源热泵系统基本相同。

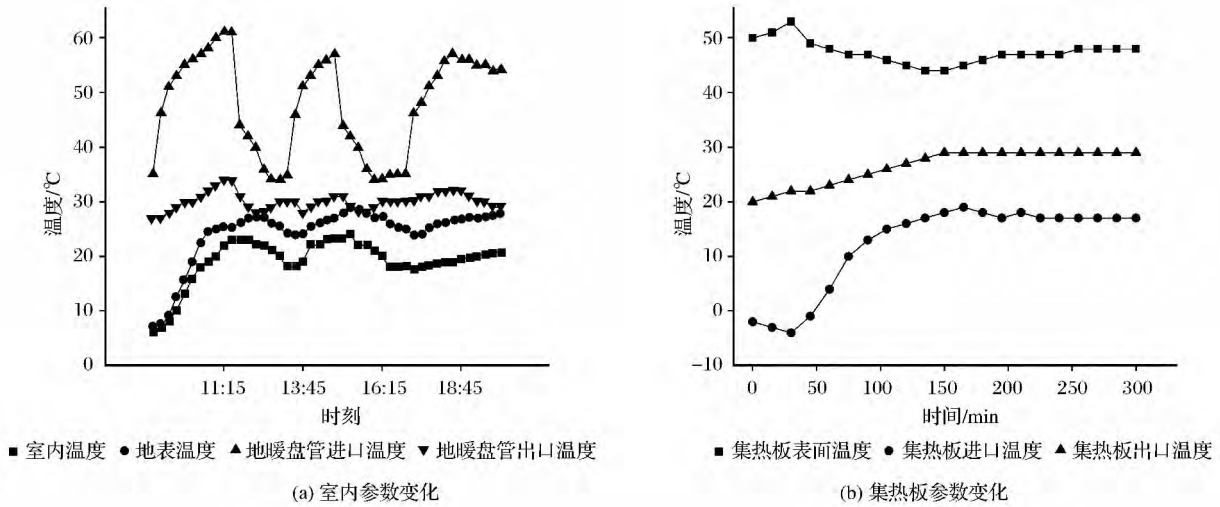


图 2 系统全天运行的参数变化

Fig. 2 Variation of Parameters of the system running all day

通过对系统全天运行参数变化的研究可以看出,系统在冬季湿冷气候下供热运行时易结霜。当室外温度在  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,太阳能蒸发器均出现不同程度的结霜,使得蒸发效率降低,但系统 COP 仍在 2.7 以上,具有较好的节能潜力。

见图 3。由图 3 可知,温升曲线的斜率随辐射强度的增加而增加,但随运行时间的增加而逐渐减小;系统运行期间的平均能效比 COP 随着室外温度上升而上升,当室外温度为  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时达到最大值 3.8,并且系统的 COP 在 2.12~3.81 之间,符合节能与优化的要求。

不同天气状况下室内温度及平均 COP 的变化

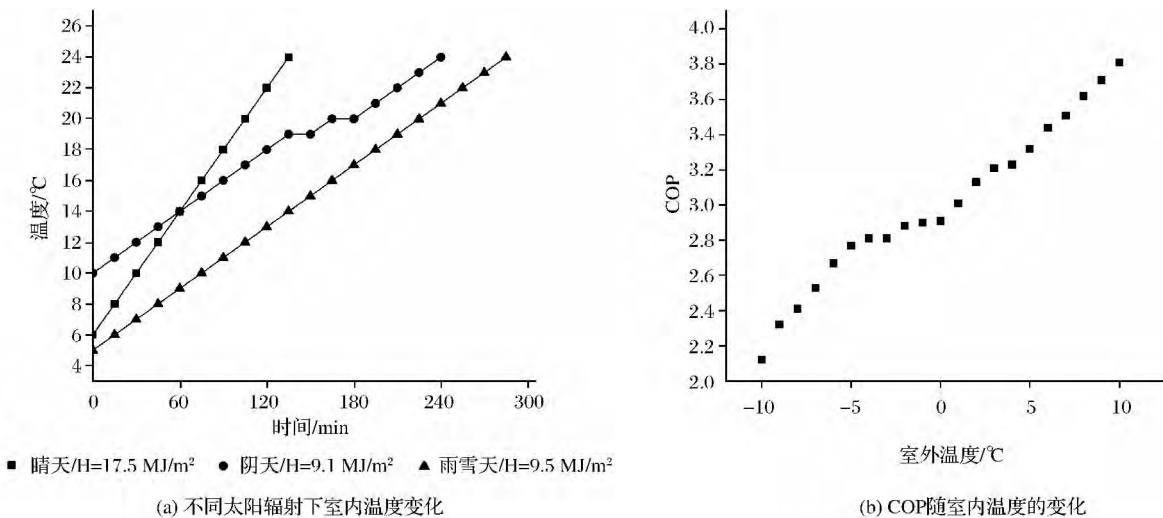


图 3 不同天气状况下室内温度及平均 COP 的变化

Fig. 3 Variation of indoor temperature and average COP under different weather conditions

## 4 结论

采用实验的方法对直接膨胀式太阳能热泵无水采暖进行研究。从实验结果来看,系统运行期间的平均能效比 COP 为 3.01,系统所能达到的最大能效比为 3.81,室内温度最高可以达到 24 ℃,能满足兰州地区冬季供暖的要求与室内热舒适性要求。

参考文献:

- [1] 韩新彬,刘慧娟.直膨式太阳能热泵热水蓄热系统实验研究[J].北京建筑工程学院学报,2013,29(1):36-38.
- [2] ASHRAE. ASHRAE Handbook Fundamentals[M]. Atlanta: ASHRAE,1989.

- [3] 卜其辉,秦红.直膨式太阳能热泵系统特性分析及优化[J].广东工业大学学报,2010,27(2):312-315.
- [4] 丁国华.太阳能建筑一体化研究、应用及实例[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [5] GB 50176-1993.民用建筑热工设计规范[S].
- [6] 李郁武,王如竹.直膨式太阳能热泵热水器运行特性的实验研究[J].工程热物理学报,2006,27(6):923-925.
- [7] 何梓年,朱敦智.太阳能供热采暖应用技术手册[M].北京,化学工业出版社,2009.
- [8] 旷玉辉,王如竹.直膨式太阳能热泵热水器的实验研究[J].工程热物理学报,2005,26(3):279-381.
- [9] Duffie J A,Beckman W A. Solar Engineering of Thermal Processes[M]. New York:Wiley,1991.

## Experimental Study of Direct-Expansion Solar Floor Heating System in Lanzhou

Wang Ying, Wu Xin, Ma Xiaoxue

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract** A new-type radiant floor heating system was proposed, and the heating system in Lanzhou was experimented and its thermal performance was analyzed. The results showed that the average COP was 3.01 and the maximum COP was 3.81 when the system was running, the maximum indoor temperature reached 24 ℃, and the new-type heating system met the requirements of winter heating and indoor thermal comfort in Lanzhou.

**Key words** Direct-expansion system; Radiant floor heating; Coefficient of performance